

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ТРЕЩИНЫ, ВЫЯВЛЯЕМОЙ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ НА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЯХ АГТД, ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРИОДИЧНОСТИ ИНСПЕКЦИЙ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

Подгорский К.Н., Гликсон И.Л., Бойко С.Ю.
АО "МОТОР СИЧ", г. Запорожье

В соответствии с требованиями норм летной годности: европейских EASA и американских FAA, проектирование основных деталей (ОД) авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) предполагает обязательное применение концепции безопасного развития трещины (КБРТ) с учетом допустимости повреждений, т.е. возможного наличия дефекта в наиболее нагруженной зоне ОД.

Периодичность инспекций ОД (процедуры контроля технического состояния ОД) по КБРТ с использованием детерминированного метода определяется как расчетная величина периода развития предполагаемой трещины в критической зоне от начального размера до критического с учетом коэффициента запаса K_N , согласованного с Компетентным органом (см. рисунок 1).

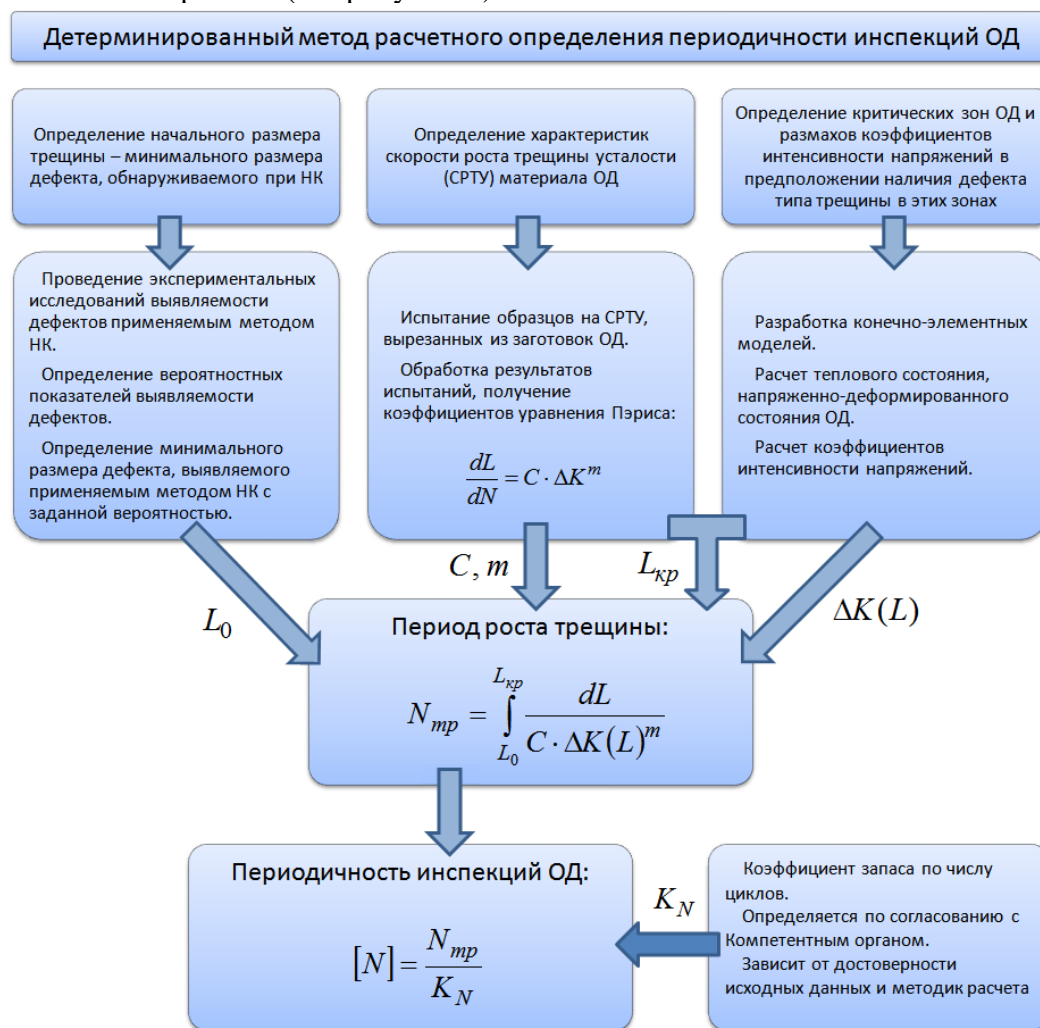


Рисунок 1 – Детерминированный метод расчетного определения периода роста трещины

Величина K_N определяется многими факторами, такими как достоверность исходных данных и методик расчета периода роста трещины. В общем случае под исходными данными и применяемыми методиками следует понимать:

- нагрузки, действующие в эксплуатационных условиях, включая тепловое состояние ОД на стационарных и переходных режимах работы двигателя (тепловое состояние и другие нагрузки должны быть подтверждены результатами экспериментальных исследований);
- статистически достоверные свойства материала ОД, в том числе характеристики трещиностойкости, определенные на образцах из полуфабриката, предназначенного для изготовления конкретной ОД;
- величину минимального размера дефекта, обнаруживаемого при неразрушающем контроле (НК) ОД, которая, согласно нормативным требованиям (см. ОСТ 1 01207-2012), должна быть определена на основе оценки эффективности НК, применяемого для критической зоны конкретной ОД;
- верифицированную методику определения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), характеризующих напряженное состояние у вершины трещины;
- метод расчета периода роста трещины, учитывающий изменение скорости роста трещины после каждого подцикла нагружения ОД.

Одним из факторов, влияющих на величину периодичности осмотров ОД (и на ресурсные показатели ОД и двигателя в целом), является эффективность НК детали на этапе ее производства, при инспекциях и ремонте. Кривые вероятности обнаружения дефекта для различных зон ОД и методов НК строятся в результате специальных исследований (испытаний [1]), которые проводятся с использованием достаточного для получения статистических оценок количества образцов-эталонов (не менее 60 шт.) с дефектами или трещинами с размерами в диапазоне от заведомо не выявляемых до выявляемых всегда. Специальные испытания проводятся на оборудовании предприятия, осуществляющего контроль ОД при изготовлении, инспекциях и ремонтах. По результатам этих исследований получают вероятностные кривые выявляемости дефектов с определенной величиной доверительной вероятности. Используя эти кривые, для заданной вероятности обнаружения дефекта определяется максимальный размер дефекта, который может быть пропущен при проведении НК данной зоны ОД применяемыми методами НК.

Для определения минимального размера дефекта, обнаруживаемого при капиллярном люминесцентном контроле ЛЮМ1-ОВ (применяемого при НК центробежных колес) на АО «МОТОР СИЧ» были проведены экспериментальные исследования (в соответствии с [1]) с использованием 155 образцов-эталонов (мини-дисков) с нанесенными усталостными трещинами длиной от 1,06 мм до 16,1 мм.

В результате тестового контроля на образцах-эталонах методом ЛЮМ1-ОВ на оборудовании и по технологии, применяемой на АО «МОТОР СИЧ», были обнаружены трещины на 8-ми образцах длиной 1,06...1,25 мм – 4 образца, 1,5 мм – 2 образца, 2,1 мм – 1 образец, 7,7 мм – 1 образец.

По результатам тестового контроля построены кривые вероятности обнаружения трещины методом ЛЮМ1-ОВ для уровней доверительной вероятности 50% и 95% (см. рисунок 2). Начальный размер трещины для расчета периода роста трещины в контролируемых критических зонах ОД, соответствующий минимальному размеру трещины, обнаруживаемой при капиллярном люминесцентном контроле ЛЮМ1-ОВ с вероятностью 90% при доверительной вероятности 95%, составил 3,37 мм (см. таблицу 1).

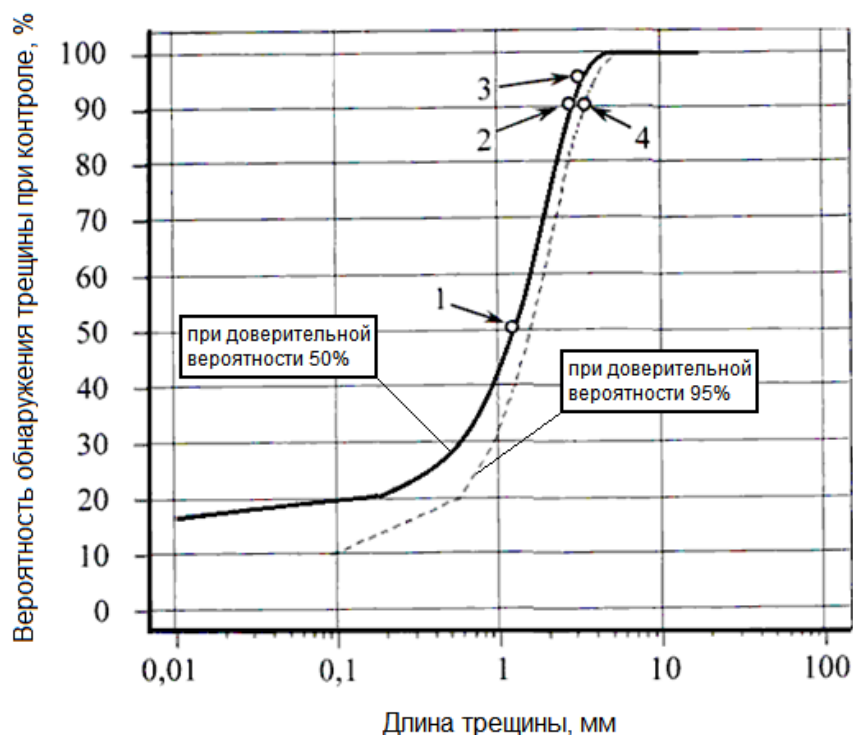


Рисунок 2 – Кривые вероятности обнаружения трещины при контроле ЛЮМ1-ОВ
(т. 1...4 – см. таблицу1)

Таблица 1 – Значение величин в точках 1, 2, 3, и 4, отмеченных на рисунке 2

Номер точки на Рисунок 1	Вероятность обнаружения трещины, % / при доверительной вероятности, %	Длина трещины, мм
1	50 / 50	1,22
2	90 / 50	2,85
3	95 / 50	3,31
4	90 / 95	3,37

Методика расчета периодичности инспекций ОД АГТД предусматривает в качестве начального размера трещины использование минимального размера трещины, выявляемой при НК с вероятностью 90% при доверительной вероятности 95%. Минимальный размер трещины, выявляемой с указанным уровнем вероятности методом ЛЮМ1-ОВ на оборудовании и по технологии, применяемой на АО «МОТОР СИЧ», составляет 3,37 мм, что существенно ниже разрешающей способности используемого метода [2] и снижает величину периодичности инспекций ОД, контролируемых этим методом.

Поскольку невыявление трещины длиной 7,7 мм является редким событием, с целью улучшения выявляемости дефектов, надежности контроля и уменьшения размеров, не обнаруживаемых ЛЮМ1-ОВ контролем дефектов, предусмотрены мероприятия по исключению значительного влияния человеческого фактора.

Для оценки характера предполагаемой трещины (раскрытая или плотносжатая) в критической зоне центробежного колеса (ЦБК) после эксплуатации ЦБК расчетным путем определена величина раскрытия трещины: выполнен расчет напряженно-деформированного состояния ЦБК с применением программного комплекса ANSYS в два шага нагружения:

- 1-й шаг – нагужение в рабочих условиях;
- 2-й шаг – разгрузка.

Конечно-элементная модель ЦБК представляет собой циклосимметричный сектор с трещиной в критической зоне – ступице. Фронт трещины выполнен в виде дуги окружности радиусом 2 мм (протяженность трещины на поверхности составляет ~4 мм).

На 1-ом шаге нагужения (в рабочих условиях) на краях трещины в ступичной части ЦБК получены окружные напряжения, которые являются положительными величинами, что свидетельствует о раскрытии трещины (см. рисунок 3).

Окружные перемещения на краях трещины в ступичной части ЦБК, полученные на 1-ом шаге, суммарно составляют 0,05 мм, что также свидетельствует о раскрытии трещины в эксплуатационных условиях (см. рисунок 4).

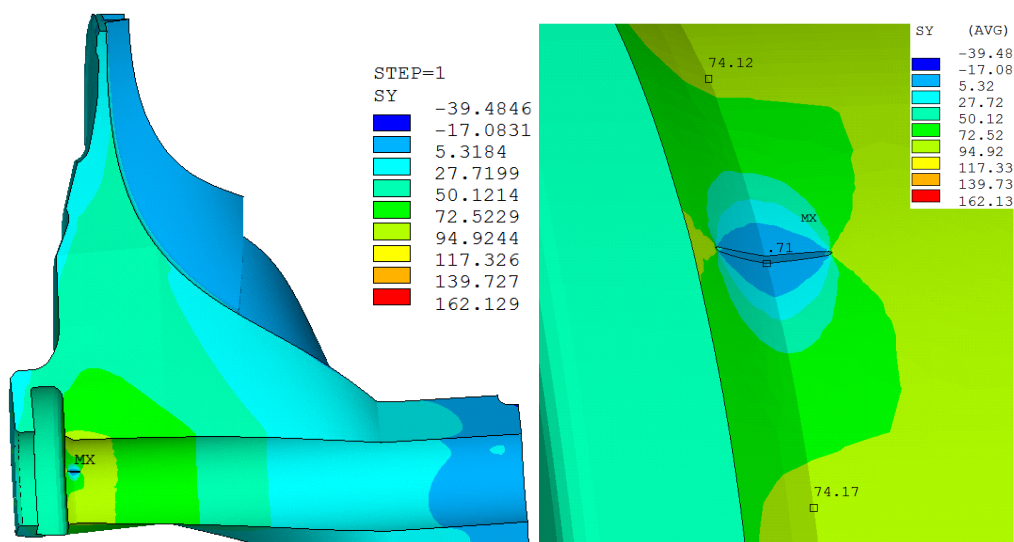


Рисунок 3 - Окружные напряжения ЦБК с трещиной на 1 шаге нагужения (рабочие условия)

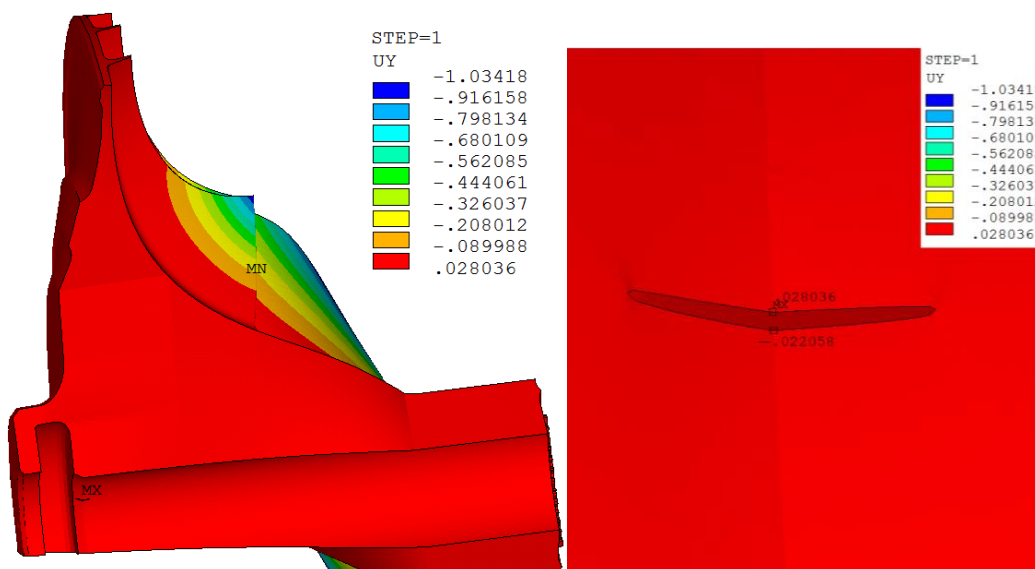


Рисунок 4 - Окружные перемещения ЦБК с трещиной на 1 шаге нагужения (рабочие условия)

На 2-ом шаге (разгрузка) на краях трещины в ступичной части ЦБК получены окружные напряжения, которые являются отрицательными величинами (см. рисунок 5). При этом, окружные перемещения, полученные на краях трещины в ступичной части

ЦБК на 2-ом шаге, суммарно составляют 4 мкм, что свидетельствует о неплотном закрытии трещины при разгрузке (см. рисунок 6).

Согласно ОСТ 1 90282-79 [2] комплект дефектоскопических материалов ЛЮМ1-ОВ позволяет выявлять поверхностные дефекты типа трещин с минимальной шириной раскрытия 0,12-0,5 мкм и протяженностью от 0,1 мм. Таким образом, выявление трещины в критической зоне ЦБК протяженностью 4 мм и шириной раскрытия 4 мкм при НК с применением капиллярного метода ЛЮМ1-ОВ является обычной операцией технологического контроля.

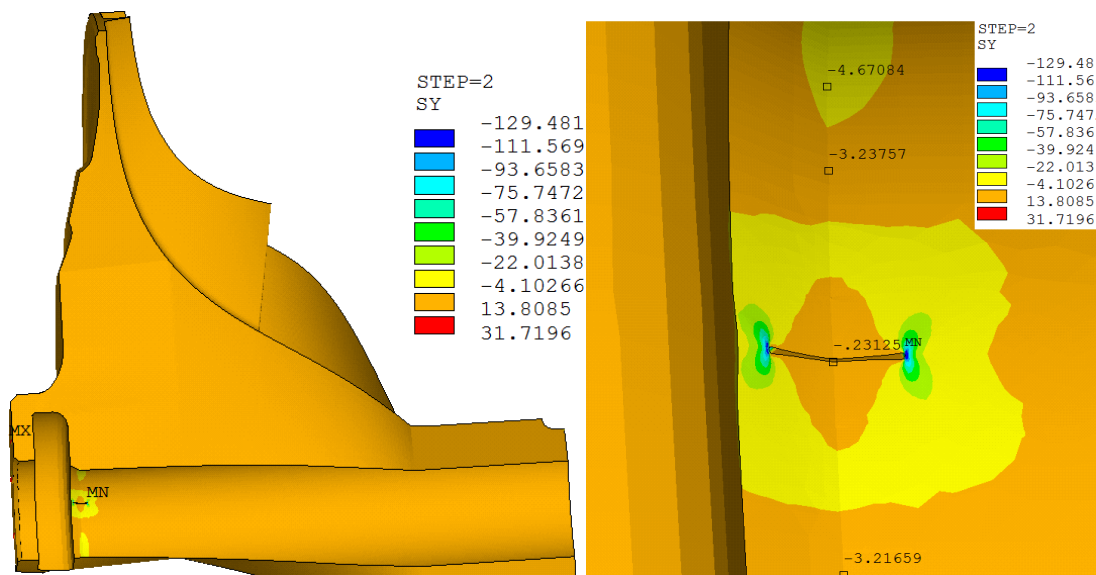


Рисунок 5 - Окружные напряжения ЦБК с трещиной на 2 шаге (разгрузка)

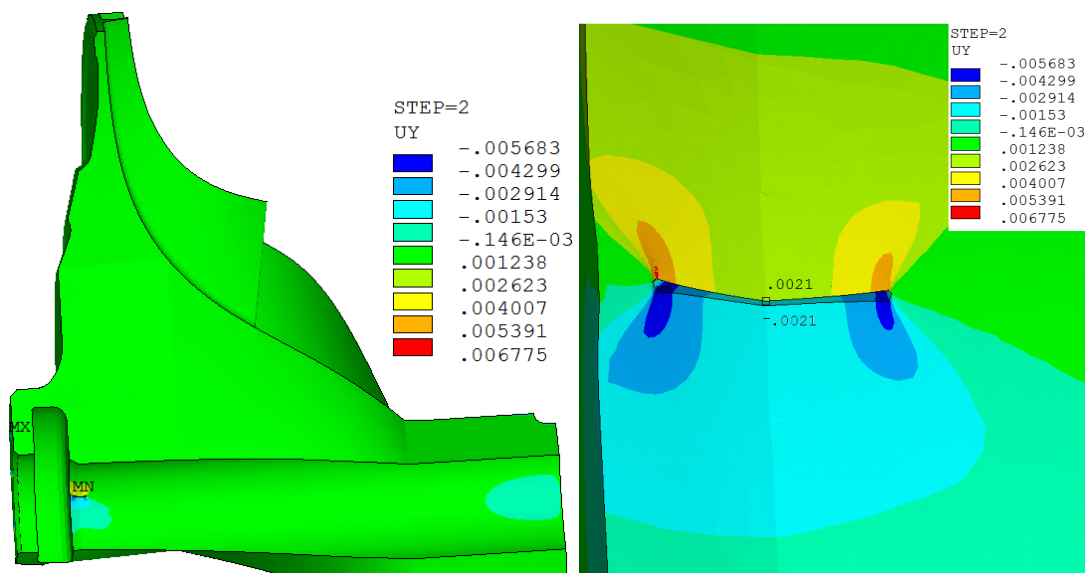


Рисунок 6 - Окружные перемещения ЦБК с трещиной на 2 шаге (разгрузка)

Для оценки влияния начального размера трещины на периодичность инспекций ЦБК выполнено несколько расчетов периода роста трещины в критической зоне ЦБК разной начальной длины.

График зависимости периода роста трещины в критической зоне и периодичности инспекций ЦБК от начального размера трещины приведен на рисунке 7.

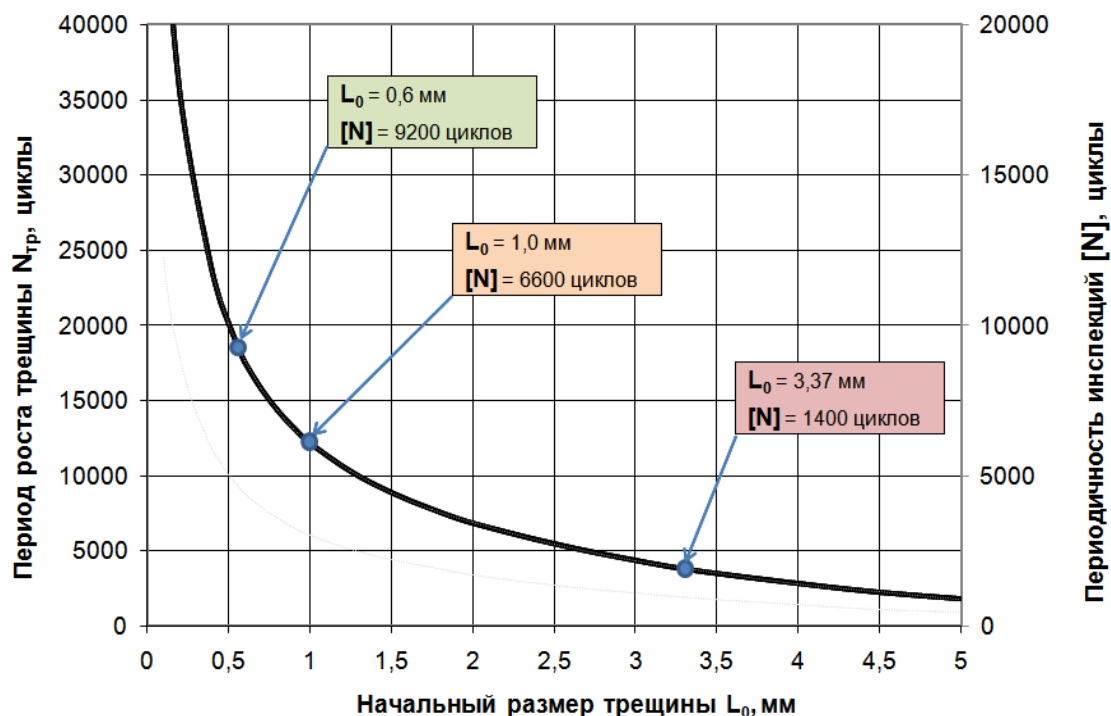


Рисунок 7 – Період росту тріщини і періодичність інспекцій ЦБК від початкового розміру тріщини

Как видно из рисунка 7, периодичность инспекций ЦБК для начального размера дефекта (трещины) 3,37 мм составляет 1400 циклов, а для размера 1 мм (предполагаемая эффективность метода ЛЮМ1-ОВ) – 6600 циклов. Таким образом, целесообразно провести работы по повышению эффективности выявляемости дефектов методом ЛЮМ1-ОВ.

Литература

1. *Авиационный стандарт. Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. ОСТ 1 01207–2012.*
2. *Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. ОСТ 1 90282-79.*